

Investigating the Possibility of Using Recycled Asphalt Pavement (RAP) and Steel Slag as a Substitute for Part of the Materials in Roller Compacted Concrete (RCC) Pavements

Mohsen Amouzadeh Omrani*

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Savadkooh Branch, Islamic Azad University, Savadkooh, Iran
m_amouzadeh@yahoo.com, omrani@iausk.ac.ir

Ali Hasannejad

PhD Student, Department of Civil Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran

Vahid Shahbazi

Department of Civil Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran

Research paper

ABSTRACT

Recycling is one of the most important issues in the construction industry in the world. Today, it is common to use different types of concrete in construction projects. One of these types of concrete is Roller Compacted Concrete (RCC), which has advantages such as fast and easy construction, lower construction costs and resistance in hot weather conditions and heavy loading. This Type concrete can be used in the construction of road pavements and all kinds of massive structures. In this study, the effect of replacing reclaimed asphalt pavements (RAP) as coarse aggregates and steel slag as fine aggregates with different percentages has been investigated on the mechanical properties of roller compacted concrete. Samples were cured for 7 and 28 days after Casting. The results of tests show that with increasing the replacement of RAP and steel slag in RCC samples, the compressive strength is significantly reduced; Compressive strength in the sample containing 100% RAP and steel slag, is approximately one third of the compressive strength of the sample; However, this declining trend has slowed down for the tensile and flexural strengths. Also, only the sample containing 25% of RAP and steel slag has the required minimum compressive strength in accordance with the relevant standards; While 28-days tensile and flexural strength in samples containing 25%, 50% and 75% of RAP and steel slag, is higher than the allowable values in accordance with the relevant standards. The results of toughness test showed that with increasing RAP and steel slag, the maximum load was decreased; however, energy absorption capacity and consequently toughness increased, due to the increase in flexibility of RCC mixtures.

Keywords: Roller compacted concrete, Reclaimed asphalt pavement, Steel slag, Concrete pavement

*Corresponding Author: Mohsen Amouzadeh Omrani

Amouzadeh Omrani, M., Hassan nezhad, A., Shahbazi, V. Investigating the possibility of using industrial waste and recycled materials as a substitute for part of the materials in roller compacted concrete pavements. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2022; 7(1): 1-20.
<http://doi.org/10.30478/jcsm.2022.336813.1263>

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

بررسی امکان استفاده از مصالح خرده آسفالت بازیافتی و سرباره فولاد به عنوان جایگزین بخشی از مصالح در روسازی‌های بتن غلتکی

محسن عموزاده عمرانی

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران
m_amouzadeh@yahoo.com, Mo.Omrani@iaau.ac.ir
(نویسنده مسئول)

علی حسن نژاد

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران

وحید شهبازی

گروه مهندسی عمران، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

یکی از مسائل مهم حال حاضر جهان در صنعت ساخت و ساز، مسأله بازیافت است. امروزه استفاده از انواع مختلف بتن در پروژه‌های عمرانی، امری متداول است. یکی از انواع این بتن‌ها بتن غلتکی می‌باشد، که دارای مزایایی از قبیل اجرای سریع و آسان، هزینه‌های کمتر اجرا و مقاومت در شرایط آب و هوایی گرم و تحت بارگذاری سنگین است. این بتن در ساخت روسازی‌های راه و انواع سازه‌های حجیم قابل استفاده می‌باشد. در این پژوهش به بررسی تاثیر جایگزینی مصالح خرده آسفالت بازیافتی به عنوان مصالح درشت دانه و سرباره فولاد به عنوان مصالح ریزدانه با درصد‌های متفاوت بر مشخصات مکانیکی بتن غلتکی پرداخته شده است. نمونه‌های مخلوط پس از ساخت، به مدت ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش جایگزینی مصالح خرده آسفالتی و سرباره فولاد در نمونه‌های بتن غلتکی، مقاومت فشاری به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است؛ به طوری که مقاومت فشاری در نمونه حاوی صد در صد مصالح بازیافتی و سرباره، تقریباً یک سوم مقاومت فشاری نمونه شاهد شده است؛ اما، در مقاومت کششی و خمشی این آهنگ کاهش، کندتر شده است. همچنین، تنها نمونه حاوی ۲۵٪ مصالح خرده آسفالتی و سرباره، حداقل مقاومت فشاری لازم را مطابق با استانداردهای مربوطه داراست؛ در حالی که مقاومت کششی و خمشی ۲۸ روزه در نمونه‌های حاوی ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ مصالح خرده آسفالتی و سرباره، بالاتر از مقادیر مجاز مطابق با استانداردها می‌باشد. نتایج آزمایش چقرمگی نشان داد که با افزایش مصالح خرده آسفالتی و سرباره فولاد، مقدار بار حداکثر کاهش یافت؛ ولی با توجه به افزایش تغییر شکل پذیری مخلوط‌های بتن غلتکی، قابلیت جذب انرژی و به تبع آن چقرمگی افزایش یافت. واژه‌های کلیدی: بتن غلتکی، خرده آسفالت، سرباره فولاد، روسازی بتنی

در سال‌های اخیر استفاده از بتن غلتکی در ساخت روسازی راه با استقبال فراوانی همراه بوده است، که این امر نیز به دلیل توجیحات فنی و اقتصادی این روش نوین ساخت است. بتن غلتکی مخلوط بتنی با اسلامپ صفر است که در هنگام اجرا توسط غلتک کوبیده و متراکم می‌گردد و دارای شرایطی منحصر به فرد از جهت سادگی اجرا و کم هزینه بودن است. همه ساله حجم زیادی از مصالح زائد در جهان در حال تولید است که از این بین سهم بسیار کمی به بازیافت و استفاده مجدد تعلق می‌گیرد. استفاده از خرده آسفالت در تهیه بتن غلتکی سبب کاهش میزان مصرف سنگدانه در بتن و کاهش مخاطرات محیط زیستی می‌گردد.

یکی از کاربردهایی که به‌تازگی مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از مصالح بازیافتی در مخلوط‌های سیمانی از جمله بتن است. سرباره کوره فولاد، محصول جانبی صنعت فولاد می‌باشد که با توجه به سیلیس آمورف از خاصیت پوزولانی برخوردار است. سرباره از آهک، سیلیس، آلومین و مقادیری اکسیدهای آهن و اکسید منیزیم و اکسیدهای قلیایی تشکیل یافته است. بدین ترتیب به دست آوردن راهی برای استفاده از این مصالح بازیافتی در مخلوط پایه‌ای مانند بتن غلتکی چنانچه منجر به افزایش خواص مکانیکی آن مانند مقاومت فشاری، خمشی و سایر خواص مکانیکی شود، بسیار مناسب خواهد بود [۱]. هرساله میلیون‌ها کیلوگرم سرباره در کشور تولید می‌شود که حاوی مواد و ترکیبات با ارزشی مانند اکسید کلسیم، اکسید منیزیم، آهن، فسفر، منگنز و سیلیسیم می‌باشد. این مواد علاوه بر محدودیت‌های فیزیکی احتمالاً خطرات بالقوه زیست‌محیطی را نیز در بر دارد. هوانگ و همکاران [۲] به بررسی تاثیر جایگزینی سنگدانه مخلوط‌های بتنی با خرده آسفالت در غالب جایگزینی با درشت‌دانه، ریزدانه و جایگزین نمودن با هر دو مورد پرداختند. بررسی صورت پذیرفته بیانگر کاهش مقاومت فشاری و کششی بتن تهیه شده با خرده آسفالت در مقایسه با بتن متداول بود. در پژوهشی دیگر به بررسی درصدهای متفاوت جایگزینی مصالح سنگدانه با خرده آسفالت پرداخته شد. خرده آسفالت با درصدهای ۲۰، ۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد در مخلوط بتنی جایگزین شد. نتایج حاصله حاکی از کاهش مقاومت فشاری و کششی با افزایش میزان جایگزینی خرده آسفالت با سنگدانه طبیعی داشت. همچنین نسبت کاهش مقاومت خمشی نمونه‌ها در مقایسه با مقاومت فشاری شیب کمتری داشت [۳]. بررسی صورت گرفته در خصوص مقایسه جایگزینی خرده آسفالت با مصالح درشت دانه و ریزدانه بیانگر مقاومت مناسب‌تر بتن غلتکی تهیه شده با مصالح زبردانه از خرده آسفالت در مقایسه با مصالح خرده آسفالت به عنوان درشت دانه در بتن غلتکی دارد [۴]. وجود مصالح خرده آسفالتی می‌تواند مقاومت چقرمگی مخلوط بتن غلتکی را افزایش دهد. بدین ترتیب، ظرفیت تحمل بار پیش از گسیختگی و شکست در روسازی افزایش می‌یابد [۵].

در پژوهشی مستوفی نژاد و نظری منفرد [۶] تاثیر استفاده از سرباره فولاد کارخانه ذوب اصفهان با بخشی از سنگدانه بتن غلتکی پرداختند. نتایج حاصله بیانگر افزایش مقاومت فشاری بتن با جایگزین نمودن ۲۵ درصد سنگدانه با سرباره دارد. در صورت افزایش میزان درصد جایگزینی سرباره کاهش مقاومت فشاری بتن به صورت صعودی مشاهده می‌شود. همچنین در پژوهش دیگری محمدپور و شفیع‌الدینی [۷] به بررسی تاثیر نفوذپذیری و مقاومت بتن با جایگزینی کنستانتره آهن به جای سیمان پرداختند. در این پژوهش ۱۴۰ نمونه بتنی با درصدهای متفاوت جایگزینی سیمان با کنستانتره آهن مورد بررسی قرار گرفت که افزایش میزان کنستانتره نفوذپذیری بتن را به صورت قابل ملاحظه کاهش داده و از سوی دیگر سبب کاهش مقاومت خمشی بتن نیز می‌گردد. درصد مناسب جایگزینی سیمان را با کنستانتره آهن به میزان ۵ الی ۱۵ درصد پیشنهاد نمودند.

در بررسی لم و همکاران [۸] جایگزینی مصالح سرباره کوره قوس الکتریکی فولاد با مصالح درشت‌دانه در بتن غلتکی نشان‌دهنده کاهش اندک مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیک نسبت به نمونه شاهد در کلیه زمان‌های عمل‌آوری بتن دارد. نکته حائز اهمیت افزایش مقاومت در برابر سایش در نمونه‌های تهیه شده با مصالح

سرباره در مقایسه با نمونه شاهد است. در صورت جایگزین نمودن ۱۰۰ درصد مصالح درشت‌دانه با سرباره کوره فولاد همچنان مقاومت مناسب بتن تهیه شده برای روسازی بتن غلتکی حاصل می‌گردد. بررسی امکان استفاده از سرباره کوره فولاد به عنوان درشت‌دانه و ریزدانه در بتن بیانگر نتایج مناسب‌تر استفاده به عنوان درشت‌دانه است. در بررسی آزمایشگاهی صورت گرفته خصوصیات مکانیکی بتن‌های غلتکی تهیه شده از ریزدانه نسبت به درشت‌دانه مشخصات ضعیف‌تری دارد. سرباره فولاد به دلیل زاویه‌دار بودن و زبری زیاد سبب افزایش قفل و بست مصالح درشت‌دانه با بتن و در نتیجه بهبود مشخصات مکانیکی آن می‌گردد [۹]. در مطالعات فخریان و همکاران [۱۰] به بررسی تاثیر جایگزینی خرده لاستیک با مصالح ریزدانه ماسه در بتن پرداخته شد. در این تحقیق نمونه‌های بتنی شامل خرده لاستیک با درصدهای جایگزینی (۰، ۵ و ۱۰) درصد و الیاف فولادی با درصدهای (۰، ۵/۰ و ۱) تهیه شده و در دمای (۲۵، ۴۰۰، ۶۰۰) درجه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بیانگر کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها با جایگزین نمودن الیاف فولادی و خرده آسفالت به صورت عادی و تحت حرارت دارد.

در بررسی مانسو و همکاران [۱۱] استفاده از سرباره فولاد سبب بهبود مقاومت فشاری بتن نسبت به بتن معمولی با سنگدانه‌های طبیعی گردید. اما ارزیابی دوام بتن ساخته شده با سرباره در برابر چرخه یخ زدگی و ذوب بتن در مقایسه با بتن با سنگدانه طبیعی ضعیف‌تر ارزیابی شد. مقاومت فشاری بتن با سرباره فولاد طی ۳۰ چرخه متوالی یخ‌زدگی و خشک نمودن مجدد به میزان ۴۰ درصد نسبت به بتن معمولی کاهش بیشتر داشته است. در پژوهش فلاچینی و همکاران [۱۲] از سرباره کوره ذوب القای الکتریکی جهت تولید بتن پرمقاومت استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده این موضوع است که بتن ساخته شده از سرباره فولاد سبب افزایش مقاومت فشاری بتن به میزان ۳۵ الی ۴۵ درصد شده است. همچنین بتن ساخته شده از سرباره فولاد در برابر کلراید دوام مناسب‌تری دارد [۱۳]. ادبوج و همکاران [۱۴] به بررسی اثر جایگزینی مشترک سیمان و ماسه با خاک رس بنتونیت و خرده لاستیک بر خواص مهندسی بتن با مقاومت ۲۵ مگا پاسگال پرداختند. چگونگی تشکیل ریز ساختارها، ترکیبات عنصری و فازهای کریستالی با استفاده از آزمایش‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی، طیف سنج اشعه ایکس و پراش اشعه ایکس تعیین گردید. نتایج نشان داد که مواد تشکیل دهنده دارای الزامات مهندسی کافی برای تولید بتن است. بتن لاستیکی بنتونیتی اصلاح شده دارای خواص مکانیکی و ریزساختاری قابل مقایسه با بتن ساده است و می‌تواند برای ساخت کف‌ها و گذرگاه‌ها مناسب باشد.

مطالعات تاو جی و همکاران [۱۵]. بر روی بتن بازیافتی نشان می‌دهد که هرچه میزان رطوبت سنگدانه‌ها در هنگام اختلاط بالاتر باشد، با طرح مخلوط یکسان، به مقاومت فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزه بالاتری می‌توان دست یافت صالحان و محی‌الدین [۱۶] در مطالعه‌ای روی بتن بازیافتی با خواص اصلاح شده با روش فرو بردن در اسید و بتن معمولی در ساخت نمونه‌های بتنی استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد، کارایی این دو نوع بتن که طرح مخلوط یکسانی دارند، تفاوت چندانی ندارد. همچنین با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی میزان کارایی بتن کاهش می‌یابد.

در پژوهش کریمی گوغری و همکاران [۱۷] به بررسی امکان استفاده از خرده آسفالت به عنوان جایگزین سنگدانه پرداخته شد. در این پژوهش خرده آسفالت بازیافتی در سه حالت جایگزینی با درشت‌دانه و ریزدانه، جایگزینی با درشت‌دانه و جایگزینی با ریزدانه با درصدهای جایگزینی ۰، ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ درصد صورت پذیرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از خرده آسفالت بازیافتی به عنوان بخشی از سنگدانه بتن غلتکی روسازی تاثیری بر روانی، تراکم پذیری، مقادیر سیمان و آب مخلوط نداشته است، اما مقاومت فشاری با افزایش هرچه بیشتر درصد استفاده از خرده آسفالت بازیافتی، کاهش می‌یابد.

در پژوهش عاملی و همکاران [۱۸] به تاثیر استفاده از خرده آسفالت بر انعطاف پذیری بتن غلتکی پرداخته شده است. صرف‌نظر از نوع مصالح بازیافتی در بتن غلتکی، میزان مصالح بازیافتی و تاثیر دانه بندی مصالح بازیافتی در

۳۲ طرح مختلف بتن غلتکی در درصدهای متفاوت سیمان و مصالح بازیافتی مورد بررسی قرار گرفت. از جمله مهم‌ترین نتایج پژوهش، افزایش جذب انرژی بتن غلتکی با افزودن مصالح بازیافتی و کاهش مدول الاستیسته آن با افزایش درصد جایگزینی مصالح بازیافتی است.

در پژوهش‌های پیشین بررسی تأثیر استفاده هم‌زمان سرباره کوره فولاد و خرده آسفالت بازیافتی بر خواص مکانیکی روسازی بتن غلتکی مورد مطالعه قرار نگرفته است. بیشتر تحقیقات انجام‌شده در زمینه بتن غلتکی بر پایه بررسی نقش مصالح محلی روی رفتار بتن غلتکی استوار بوده است. این تحقیق ضمن بازیافت خرده‌های آسفالت و استفاده از سرباره کوره فولاد که حجم انبوهی از پسماند را ایجاد می‌کند، علاوه بر حفظ محیط‌زیست، باعث کاهش استفاده از منابع طبیعی شن و ماسه می‌شود. همچنین خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی با افزودن جداگانه و توأمان خرده آسفالت و سرباره فولاد در درصدهای مختلف مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

۲- مشخصات و دانه‌بندی مصالح مورد استفاده

مصالح اصلی مورد استفاده در این پژوهش شامل مصالح سنگی، سیمان، خرده آسفالت بازیافتی، سرباره فولاد و آب است. مصالح سنگی مصرفی در این مطالعه از نوع شکسته می‌باشد.

۲-۱- سنگدانه

سنگدانه‌ها در ساخت بتن غلتکی باید دارای کیفیت و دانه‌بندی مناسب باشند. سنگدانه‌ها به صورت طبیعی یا شکسته و یا مخلوطی از این دو، مورد استفاده قرار گرفتند. سنگدانه‌های به‌کار رفته در بتن غلتکی در پژوهش پیش رو دارای بخش ماسه، شن، خرده آسفالت و سرباره فولاد می‌باشند. مشخصات سنگدانه‌های ریز و درشت مطابق استانداردهای *ASTM C3* [۱۹]، *ASTM C127* [۲۰] و *ASTM C128* [۲۱] تعیین شده است. خرده آسفالت مورد استفاده درشت دانه بوده و رس و ریزدانه داخل نمونه‌های مورد بررسی نیست و محل تهیه این مصالح از دیوی غرب تهران می‌باشد (شکل ۱- الف).

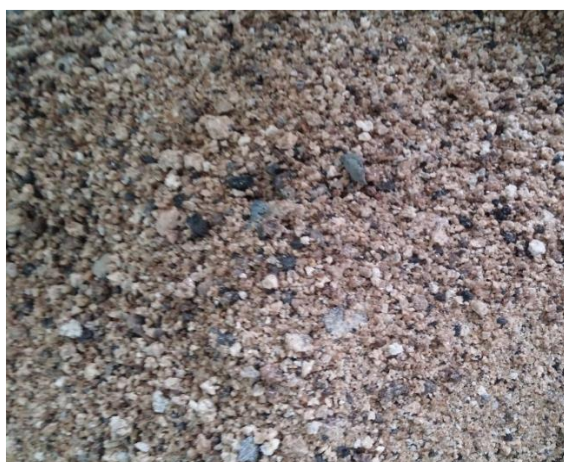
سرباره فولادسازی یک فرآورده جانبی صنایع آهن و فولاد است که به مقدار زیاد در اصفهان تولید می‌شود و با توجه به حضور سیلیس آمورف در ترکیب آن به‌عنوان ماده‌ای با خاصیت پوزولانی محسوب می‌گردد. هر ساله ۲۵۰ میلیون کیلوگرم سرباره در اصفهان تولید می‌شود که حاوی مواد و ترکیبات باارزشی مانند اکسید کلسیم، اکسید منیزیم، آهن، فسفر، منگنز و سیلیسیم می‌باشد. این مواد در حال حاضر بدون استفاده مانده که علاوه بر محدودیت‌های فیزیکی احتمالاً خطرات بالقوه زیست‌محیطی را نیز در پی دارد. بنابراین در صورت استفاده از این مواد در طرح‌های مختلف می‌توان علاوه بر استفاده بهینه از آنها، تا اندازه‌ای از هزینه‌های تحمیلی جهت نگهداری و انتقال آن‌ها کاست. ماده مذاب سرباره که به دلیل سبک‌تر بودن بالاتر از فولاد مذاب قرار می‌گیرد، باید از کوره خارج شود تا به صورت مصالح دانه‌ای در آید. برای سرد کردن سرباره از دو روش استفاده می‌شود. روش اول خنک‌سازی و گرانول نمودن سرباره با آب است، که این نوع خنک‌سازی سرباره، مسائل و مشکلاتی را نیز به همراه دارد؛ مانند، مصرف زیاد آب، آلودگی محیط زیستی با ایجاد پسابهای ناشی از ترکیب آب با عناصر قلیایی موجود در سرباره و همچنین آلودگی هوا. روش دوم، روش خنک‌سازی سرباره در هواست، که به آهستگی انجام می‌گیرد. در این روش، به دلیل ایجاد شرایط و داشتن زمان کافی برای سرد کردن، سرباره به آهستگی سرد می‌شود و به شکل بلوری بسته و سخت می‌شود. سرباره تولید شده در این روش را برای ساخت بالاست جهت زیرسازی ریل راه آهن، مصالح زیرسازی جاده‌ها، مصالح آسفالت و بتن مورد استفاده قرار می‌دهند [۹].

سرباره مورد استفاده در این پژوهش، که از روش دوم تهیه شده است، به عنوان جایگزین مصالح ریزدانه و دارای تمیزی نسبی و دانه‌بندی خوبی است. سرباره فولاد ترکیبی غیرفلزی است که دارای سیلیکات‌های کلسیم، فریت-های کلسیم و اکسیدهای آهن، آلومینیوم، منگنز، کلسیم و منیزیم است و به‌طور هم‌زمان با فولاد تولید می‌شود.

سرباره مورد استفاده در این پژوهش از نوع سرباره فولاد کوره اکسیژنی (BOF) با فرآیند کنورتر اکسیژنی است (شکل ۱-ب). در جدول ۱ مشخصات خرده آسفالت و سرباره فولاد تهیه شده از کارخانه فولاد مبارکه اصفهان ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات مصالح باز یافتی مورد استفاده در بتن غلتکی

نام مصالح	نوع جایگزینی	شرکت تولیدکننده	چگالی واقعی (g/cm ³)	جذب آب %	میزان قیر	درجه نفوذ قیر (°/1mm)
سرباره فولاد	ریزدانه	فولاد مبارکه	۲/۷۹	۳/۳	-	-
خرده آسفالت	درشت دانه	دپوی غرب تهران	-	-	۵/۲ درصد	۱۶



(الف) (ب)

شکل ۱- مصالح باز یافتی مورد استفاده، الف) درشت دانه خرده آسفالت، ب) سرباره فولاد

۲-۲- سیمان

برای اطمینان از کیفیت مطلوب سیمان مورد دسترس یک سری آزمایش‌ها بر روی سیمان مصرفی (تیپ ۲ تهران) انجام پذیرفت. پس از انجام به میزان ۲۰۰ کیلوگرم از این سیمان تهیه و تا پایان آزمایش‌ها در محل حفاظت شده، نگهداری گردید. ترکیبات سیمان مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- ترکیبات شیمیایی سیمان مصرفی

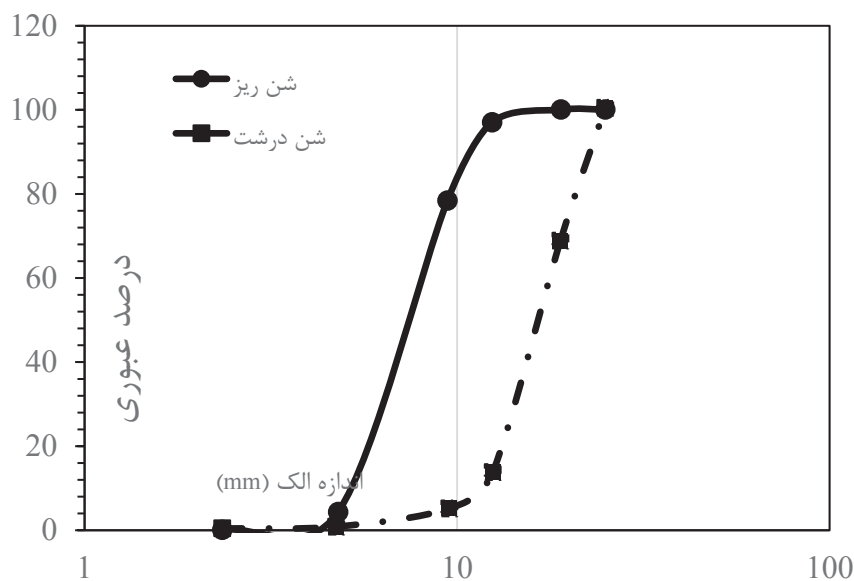
ترکیبات شیمیایی	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI	سایر
درصد	۶۱/۷۱	۲۱/۰۴	۴/۷۵	۳/۶۱	۱/۱۹	۲/۳۵	۰/۶۱	۰/۵۴	۱/۷۳	۲/۴۷

۲-۳- آب

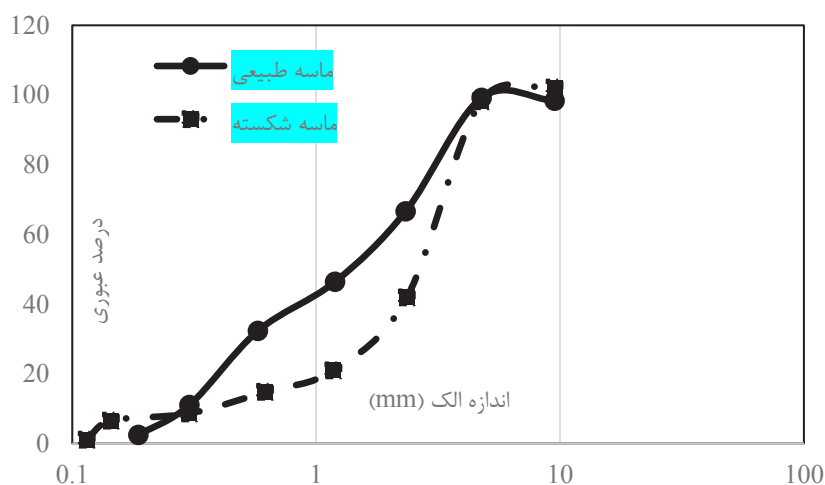
برای ساخت نمونه‌ها از آب آشامیدنی استفاده گردید. در بتن غلتکی، آب مورد نیاز هیدراتاسیون شیمیایی از دو منبع تأمین می‌شود. قسمتی از آن از طریق آب اضافی (آب آزاد) در ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها تأمین می‌شود و قسمت دیگر آن با اضافه کردن آب به همزن تأمین می‌شود. کیفیت آب مصرفی باید الزامات استاندارد ASTM C1602 را داشته باشد.

۲-۴-دانه‌بندی مصالح

در این تحقیق از شن درشت و ریز طبیعی و ماسه شکسته به عنوان مصالح سنگی استفاده شده است. همچنین در بخشی از آزمایش‌ها برای تهیه مخلوط با درصد‌های مختلف ریزتر از الک ۲۰۰ از ماسه طبیعی غیر شسته نیز استفاده گردید. حداکثر اندازه دانه‌های شن ۱۹ میلی‌متر می‌باشد. نمودارهای دانه‌بندی، پس از تعیین وزن باقیمانده روی الک‌های استاندارد و تعیین درصد عبوری ترسیم شده است. در شکل ۲ و ۳ نمودار دانه‌بندی مصالح درشت‌دانه و ریزدانه به ترتیب ارائه شده است.



شکل ۲- دانه‌بندی مصالح درشت‌دانه



شکل ۳- دانه‌بندی مصالح ریزدانه

۲-۵- تعیین وزن مخصوص و جذب آب مصالح

این آزمایش به تفکیک برای مصالح شن درشت و شن ریز انجام شد. برای تعیین وزن مخصوص اشباع، از حجم سنگ‌دانه‌ها با در نظر گرفتن حفرات موجود در آن‌ها استفاده شده است. ولی محاسبه وزن مخصوص حقیقی، بر اساس حجم واقعی سنگدانه‌ها (بدون حفرات) بوده است. جدول ۳ نتایج این آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۳- وزن مخصوص و جذب آب سنگدانه بتن غلتکی

نوع سنگدانه	وزن مخصوص ظاهری g/cm^3	وزن مخصوص حقیقی g/cm^3	جذب آب ۲۴ ساعته
شن ریز دانه	۲/۳۳۷	۲/۳۲۵	۱٪
شن درشت دانه	۲/۳۳۵	۲/۲۳۷	۱٪
ماسه شسته	۲/۱۵۵	۲/۱۴۹	۳/۱٪
ماسه فیلردار	۲/۶۲۱	۲/۴۵۷	۲/۳٪

۳- طرح مخلوط

دو روش عمده برای طرح مخلوط بتن غلتکی تراکم خاک و آزمون‌های روانی می‌باشد. در طرح به روش تراکم خاک، تعیین نسبت‌های اختلاط در حقیقت برقراری رابطه بین وزن واحد خشک و میزان رطوبت در یک محدوده مشخص رطوبت است. این روش مشابه با روش مورد استفاده برای تعیین رابطه بین مقدار رطوبت بهینه و وزن واحد خشک خاک‌ها و مصالح سنگی می‌باشد. در روش آزمون‌های روانی، طراحی بر پایه و اصل کلی دستیابی به مقاومت طرح و بهینه‌ترین کارایی صورت می‌پذیرد. در این روش فرض بر این است که تراکم با میز *vebe* اصلاح شده صورت می‌گیرد.

طراحی مخلوط برای هر سری از نمونه‌ها به این صورت انجام می‌پذیرد، که پس از تعیین نسبت آب به سیمان و بررسی عیار سیمان نمونه‌ها متناسب با میزان مواد افزودنی به ۵ دسته تقسیم شدند که در جدول ۴ ارائه شده است. مقدار کل سیمان در بتن *RCC* بین ۱۲ تا ۱۶ درصد وزن خشک مصالح سنگی توصیه شده است [۲۳ و ۲۲]. بنابراین، در این پژوهش میزان سیمان با انجام چند پیش‌آزمایش و مشابه پژوهش‌های مشابه برای همه نسبت‌های اختلاط، ثابت (مقدار میانگین ۱۴ درصد در این پژوهش) در نظر گرفته شده است [۹، ۲۴ و ۲۵]. نمونه‌ها پس از ساخت، برای عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه، در حوضچه آب با دمای ۲۵ درجه سانتیگراد قرار داده شدند. بدین ترتیب که ۲۱ نمونه به مدت ۷ روز و ۲۱ نمونه به مدت ۲۸ روز در حمام آب قرار گرفت. با توجه به ابعاد قالب $15 \times 15 \times 15$ سانتی‌متر، حداقل ظرفیت جام مخلوط‌کن باید ۱۲/۰ متر مکعب باشد. مشخصات مخلوط‌های مختلف به همراه خواص مخلوط تازه آنها در جدول ۴ آورده شده است.

بعد از ساخت بتن و انتقال صحیح آن به قالب، نیاز است تا انرژی لازم جهت تراکم به بتن اعمال شود. برای رسیدن به تراکم مدنظر، میزان انرژی 1551 kJ/m^3 در نظر گرفته می‌شود. در این آزمایش، بتن *RCC* در ۳ لایه در داخل قالب اجرا می‌شود. سپس با ۵۰ الی ۱۵۰ ضربه متراکم می‌گردد. قرار دادن بارهای استاتیکی بر روی نمونه باعث می‌شود هم سطح نمونه صاف نگه داشته شود و هم باعث ایجاد تحکیم نمونه شود. سپس نمونه‌ها در زیر گونی‌های خیس قرار خواهند گرفت و بعد از ۲ الی ۳ روز قالب‌ها باز شده و دوره عمل‌آوری آغاز خواهد شد.

جدول ۴- مشخصات و نسبت‌های طرح مخلوط‌های مختلف و خواص مخلوط‌های تازه

نام نمونه	مجموع درصد سرباره و خرده آسفالت	درصد مصالح سنگی	مجموع مقدار سرباره و خرده آسفالت (kg/m ³)	مقدار مصالح سنگی (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	وزن مخصوص نمونه (kg/m ³)	زمان vebe (s)
RAPSS25	۲۵	۷۵	۵۰۹	۱۵۲۷	۱۱۴	۲۸۵	۲۳۳۳	۳۹
RAPSS50	۵۰	۵۰	۱۰۱۸	۱۰۱۸	۱۱۴	۲۸۵	۲۳۱۰	۳۷
RAPSS75	۷۵	۲۵	۱۵۲۷	۵۰۹	۱۱۴	۲۸۵	۲۲۷۸	۳۳
RAPSS100	۱۰۰	۰	۲۰۳۶	۰	۱۱۴	۲۸۵	۲۲۲۵	۳۱
Plain mixture	۰	۱۰۰	۰	۲۰۳۶	۱۱۴	۲۸۵	۲۳۹۱	۴۲

۴- آزمایش‌های انجام شده

برنامه آزمایشگاهی در این پژوهش شامل آزمایش‌های مقاومت فشاری، کشش غیرمستقیم و خمش سه نقطه‌ای جهت به دست آوردن مقاومت خمشی و چقرمگی می‌باشد. با توجه به آزمایش‌های مورد استفاده در این پژوهش، بررسی روی نمونه‌ها با سن ۷ و ۲۸ روز انجام شد.

۴-۱- آزمایش مقاومت فشاری

در آزمون مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متر به دلیل شبیه‌سازی بهتر با رویه‌های بتنی استفاده شد و این آزمایش بر اساس استاندارد *ASTM C39* انجام پذیرفت. نرخ مجاز بارگذاری مطابق استاندارد مذکور ۰/۱۵ تا ۰/۳۵ مگاپاسگال بر ثانیه است. نحوه آزمایش به این صورت است که نمونه‌ها پس از رسیدن به سن عمل‌آوری شده در آب زیر جک فشاری با نرخ بارگذاری ۰/۳ مگاپاسگال بر ثانیه قرار گرفته تا نمونه‌ها تحت بار فشاری وارد به آن گسیخته شود.

۴-۲- آزمایش مقاومت کششی

این آزمایش که به آزمایش برزیلی نیز معروف است، با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد با ارتفاع ۳۰ و قطر ۱۵ سانتی‌متر برای ۵ طرح مخلوط با سن ۲۸ روزه بر اساس استاندارد *ASTM C496* و به طریق نیم شدن نمونه‌های بتنی صورت می‌گیرد. عموماً مقاومت کششی به صورت درصدی از مقاومت فشاری بیان می‌شود. در بتن‌های بازیافتی عموماً مقاومت کششی کمتر از نمونه‌های بتن معمولی است. جهت انجام آزمایش نمونه‌های استوانه‌ای به گونه‌ای زیر جک فشاری قرار داده می‌شوند که زیر جک فشاری نیروی اعمالی از سمت جک در امتداد ارتفاع نمونه و بر سطح جانبی آن اعمال گردد. نرخ بارگذاری باید بین ۰/۷ تا ۱/۴ مگاپاسگال بر دقیقه باشد. در این پژوهش نرخ بارگذاری برابر ۱ مگاپاسگال بر دقیقه در نظر گرفته شده است.

۴-۳- آزمایش مقاومت خمشی

برای اندازه‌گیری خمش از دستگاه آزمون خستگی محوری *SAF-250E (Axial Fatigue)* با ظرفیت ۲۵ تن، موجود در دانشگاه تربیت مدرس استفاده شد (شکل ۴). برای ساخت نمونه‌های مقاومت خمشی از قالب منشوری ۱۵×۱۵×۶۵ استفاده شد. با توجه به این موضوع که مهم‌ترین عامل در روسازی‌ها مقاومت خمشی می‌باشد، آزمایش مقاومت خمشی مطابق استاندارد *ASTMC78* صورت پذیرفت. نرخ بارگذاری در این آزمایش بین ۰/۸۶ تا ۱/۱۲ مگاپاسگال بر دقیقه می‌باشد که جهت آزمایش مقدار ۰/۹۵ مگاپاسگال بر دقیقه در نظر گرفته شده است. در انتهای آزمایش، مقاومت خمشی به کمک رابطه (۱) محاسبه می‌گردد.

$$F_s = \frac{3 \times P \times L}{2 \times b \times d^2} \quad (1)$$

که در این رابطه F_s مقاومت خمشی (MPa)، P حداکثر بار وارده (N)، L طول دهانه (mm)، b عرض نمونه (mm) و d عمق نمونه (mm) است.



شکل ۴- دستگاه خمش چهار نقطه‌ای

۴-۴- آزمایش چقرمگی

چقرمگی در علم مواد به مقاومت مواد در برابر شکست در اثر اعمال تنش گفته می‌شود. چقرمگی بصورت میزان انرژی جذب شده قبل از وادادگی در واحد حجم مواد تعریف می‌شود. چقرمگی اصطلاحی است که بیانگر مقدار تنش مورد نیاز برای گسترش عیوب موجود یک درز یا ترک اولیه است. به عبارتی هر چقدر مصالح چقرمه تر باشد، در اثر اعمال تنش با افزایش طول بیشتر دیرتر دچار شکست می‌شود. جهت محاسبه چقرمگی از آزمایش خمش ۳ نقطه‌ای استفاده شد. بارگذاری با نرخ کرنش ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه و فرکانس ۱ هرتز انجام شد. در رابطه (۲) فرمول محاسبه چقرمگی ارائه شده است.

$$Toughness = \int_0^{\Delta_f} F(\Delta) d\Delta \quad (2)$$

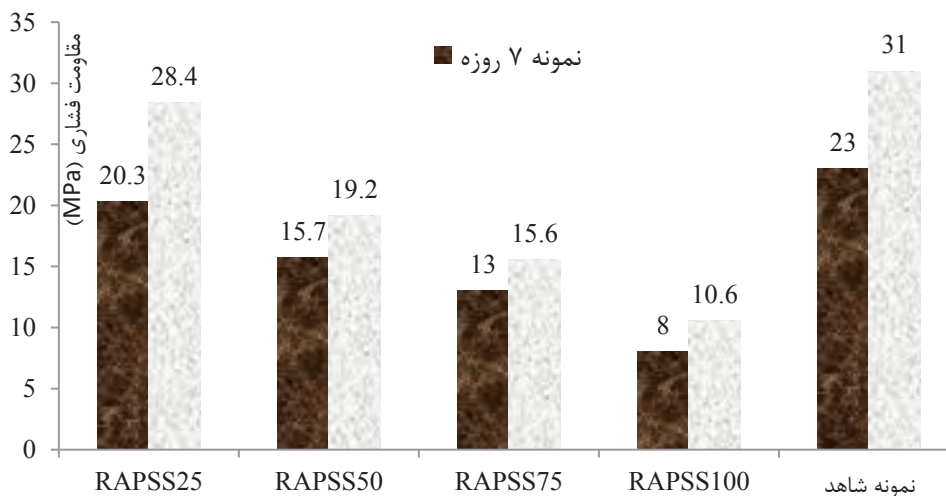
در رابطه (۲) پارامتر $F(\Delta)$ مقدار بار در وسط دهانه با تغییر شکل Δ (N)، Δ تغییر شکل وسط دهانه (mm) و $d\Delta$ حداکثر تغییر شکل وسط دهانه (mm) است.

۵- نتایج و بحث

۵-۱- مقاومت فشاری

پس از عمل آوری در مدت عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه، نمونه‌های بتنی جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری مورد استفاده قرار می‌گیرند. نمونه شاهد نمونه‌ای مرجع است که جهت مقایسه بتن غلتکی بدون خرده آسفالت و سرباره فولاد با نمونه‌هایی که حاوی آن‌ها هستند ساخته می‌شود. همانطور که گفته شد، در ساخت این نمونه‌ها از ۴۶ درصد درشت دانه (شن درشت دانه و شن ریز دانه) و ۵۴ درصد ریزدانه (ماسه شکسته) استفاده شد. مقاومت فشاری به دست آمده برای نمونه شاهد به ترتیب ۲۳ مگاپاسکال برای نمونه ۷ روزه و ۳۱ مگاپاسکال برای نمونه ۲۸ روزه می‌باشد.

در شکل ۵ نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه در نمونه‌ها با درصد‌های مختلف جایگزینی مصالح خرده آسفالت بازیافتی به عنوان مصالح درشت دانه و همچنین نمونه شاهد را نشان می‌دهد. حداقل مقاومت فشاری مجاز مطابق با استاندارد *ACI* برابر با ۲۷/۶ مگاپاسکال می‌باشد [۱۷]. نتایج حاصله نشان می‌دهد تنها مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه حاوی ۲۵٪ مصالح خرده آسفالتی و سرپاره توانسته است حداقل مقاومت فشاری لازم مطابق با استانداردهای مربوطه را کسب نماید (۲۸/۴ مگاپاسکال). همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش میزان مصالح بازیافتی در نمونه‌های بتن غلتکی، مقاومت فشاری به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. در بعضی موارد نیز مشاهده می‌گردد که تفاوت قابل ملاحظه‌ای میان مقاومت نمونه ۷ روزه و ۲۸ روزه وجود ندارد. به این دلیل که به طور کلی، بتن غلتکی، بتنی در رده بتن‌های با اسلامپ صفر است، بدان معنا که همواره دارای رطوبت به مراتب کمتری نسبت به بتن معمولی است. همانطوری که مشاهده می‌شود، با جایگزینی مصالح خرده آسفالت بازیافتی به عنوان جایگزین مصالح درشت دانه، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد؛ به طوری که در نمونه *RAPSS100* مقاومت فشاری ۲۸ روزه، ۶۱/۶ درصد کاهش مشاهده شده است، که علت آن را هم می‌توان پایین بودن کیفیت مصالح خرده آسفالت بازیافتی و همچنین کاهش چسبندگی مصالح به دلیل وجود قیر در اطراف سنگدانه‌ها عنوان کرد. زیرا این قیر، سبب تضعیف چسبندگی سطح سنگدانه‌ها به سیمان می‌شود. این امر سبب انتقال ترک به دور سنگدانه می‌شود. در این صورت بتن حاوی خرده آسفالت، به جای این‌که از قسمت ملات سنگدانه گسیخته شود، به دلیل چسبندگی ضعیف، از قسمت ملات سیمان شکسته می‌شود [۲۵]. دلیل دیگر در کاهش مقاومت فشاری می‌تواند کیفیت پایین خرده آسفالت‌های بازیافتی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی باشد. می‌توان با کنترل خواص مقاومتی خرده آسفالت‌های مصرف شده و هم چنین بهبود شرایط تماس بین آسفالت و بتن از طریق استفاده کردن از مصالح سنگی تیز گوشه باعث کاهش در میزان کم شدن مقاومت فشاری نمونه‌ها شد؛ از این رو استفاده از ریزدانه سرپاره توصیه می‌شود. ضعیف بودن اتصال میان درشت دانه و ریزدانه سبب می‌شود تا ترک به وجود آمده میان آن‌ها مانند حفرات خالی عمل کرده و به ناچار مقاومت فشاری را کاهش دهد. در این پژوهش، ماده انعطاف‌پذیر، خرده آسفالت بوده و حضور قیر نرم سبب تمرکز تنش در بتن غلتکی شده است و این تمرکز تنش‌ها و به وجود آمدن ترک‌های مویی، باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه می‌شود. در پژوهش مدرس و حسینی [۲۲] استفاده از ۱۰۰ درصد مصالح خرده آسفالتی به عنوان جایگزین مصالح درشت دانه، باعث کاهش قابل ملاحظه مقاومت فشاری (۴۱/۶ درصد) نسبت به نمونه شاهد شد. در تحقیقات دبارما و همکارانش [۵] نیز همین نتیجه حاصل شد؛ در حالی که جایگزینی مصالح ریزدانه با مصالح خرده آسفالتی کاهش بسیار کمتری در مقاومت فشاری را حاصل نمود.



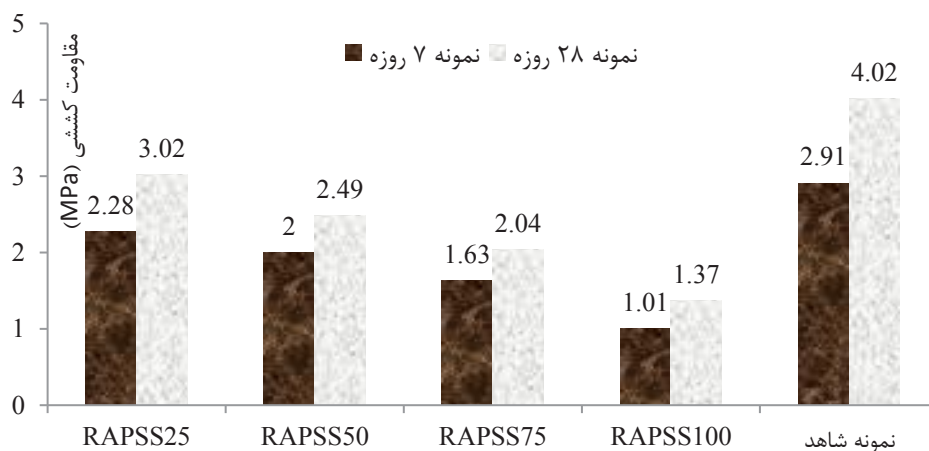
شکل ۵- نمودار مقاومت فشاری

۵-۲- مقاومت کششی

مقاومت کششی نمونه‌ها پس از ساخت و عمل آوری در سنین ۷ و ۲۸ روز در آب، مطابق استاندارد *ASTM-C496* اندازه گیری شد. این نتایج بیانگر رفتاری مشابه با نمونه های آزمایش مقاومت فشاری است. در شکل ۶ نتایج حاصل از آزمایش مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه در نمونه ها با درصد های مختلف جایگزینی مصالح خرده آسفالت بازیافتی به عنوان مصالح درشت دانه و همچنین نمونه شاهد را نشان می‌دهد. حداقل مقاومت کششی مجاز مطابق با استاندارد *ACI* برابر با ۲ مگاپاسکال می باشد [۲۶]. همانطور که مشاهده می شود بیشترین مقدار مقاومت کششی مربوط به نمونه *RAPSS25* با عمر ۲۸ روزه است که برابر با ۳/۰۲ مگاپاسکال می‌باشد و میزان ۵۱ درصد افزایش مقاومت کششی را نسبت به حداقل مقاومت کششی مجاز مطابق با استانداردهای مربوطه نشان می‌دهد. همچنین مشاهدات نشان می‌دهد که مقاومت کششی ۲۸ روزه نمونه *RAPSS25* به مقدار ۲۴/۹ درصد نسبت به مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه شاهد کاهش داشته است، که این میزان، کمترین کاهش نسبت به سایر نمونه ها می‌باشد. در نتیجه مطلوبترین نمونه در میان سایر نمونه ها از این حیث است و این در حالی است که در نمونه حاوی ۱۰۰ درصد مصالح خرده آسفالتی و سرباره فولاد، مقاومت کششی ۲۸ روزه، تا ۶۶ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش یافت که تا حد زیادی مشابه کاهش مقاومت فشاری است. در پژوهش مدرس و حسینی [۲۲] نیز نسبت کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم بسیار نزدیک به نسبت کاهش مقاومت فشاری بود؛ در حالی که، در پژوهش هوانگ و همکارانش [۲]، کاهش ۹۵/۳ درصدی در مقاومت کششی با استفاده از ۱۰۰ درصد مصالح خرده آسفالتی مشاهده شد.

مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه در نمونه *RAPSS50* نسبت به مقدار مربوط به در نمونه *RAPSS25* کاهش یافته است. در نمونه *RAPSS75* نیز مقاومت کششی حاصل شده برای عمر ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب برابر ۱/۶۳ و ۲/۰۴ مگاپاسکال می‌باشد که نسبت به مقاومت کششی نمونه های *RAPSS25* و *RAPSS50* کاهش داشته است اما همچنان در مدت عمل آوری ۲۸ روزه توانسته است تا حداقل مقاومت کششی مجاز را مطابق با استانداردهای مربوطه کسب نماید. نتایج حاصل شده پس از آزمایش در نمونه *RAPSS100* میزان مقاومت کششی (۱/۳۷) مگاپاسکال برای عمر ۲۸ روزه و ۱/۰۱ مگاپاسکال برای عمر ۷ روزه را نشان می‌دهد. همانطوری که مشاهده می‌شود در این نمونه، مقاومت کششی کاهش می‌یابد؛ به طوری که در نمونه *RAPSS100* مقاومت کششی ۲۸ روزه، ۳۲ درصد نسبت به مقادیر مجاز مطابق با آیین نامه مربوطه کاهش می‌یابد و نمی‌تواند معیارهای لازم را کسب نماید.

بنابراین مقاومت کششی ۲۸ روزه نمونه های *RAPSS25* و *RAPSS50* و *RAPSS75* بالاتر از مقادیر مجاز مطابق با آیین نامه می‌باشد و حد نصاب لازم را دار هستند.

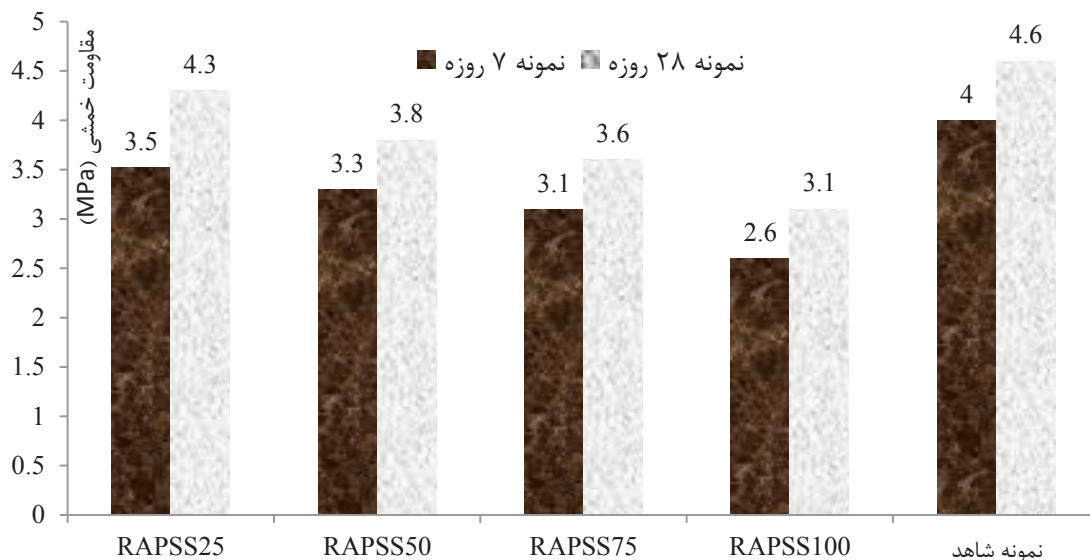


شکل ۶- نمودار مقاومت کششی

۵-۳- مقاومت خمشی

پارامتر موثر دیگر در میزان کارایی یک رویه بتن غلتکی مقاومت خمشی آن است. در بعضی از روش‌های طرح ضخامت مقدار مقاومت خمشی به طور مستقیم در روند طراحی وارد می‌شود. نیروی شکست برابر است با مقدار نیروی تحمل شده توسط بتن تا رسیدن به ترک اولیه، پس از آن نیروی تحمل شده توسط نمونه، افت شدیدی پیدا می‌کند. حداقل مقاومت خمشی مجاز، مطابق با اکثر دستورات عملیها برابر با $\frac{3}{6}$ مگاپاسکال می‌باشد [۵ و ۲۷]. بیشینه مقاومت خمشی برای نمونه *RAPSS25* برای عمر ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب برابر $\frac{3}{5}$ و $\frac{4}{3}$ مگاپاسکال می‌باشد (شکل ۷). نمونه *RAPSS50* با مجموع ۵۰ درصد جایگزینی مصالح بازیافتی در درصد برابر خرده آسفالت و سرباره است. مقدار این مقاومت برای عمر ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب برابر $\frac{3}{3}$ و $\frac{3}{8}$ مگاپاسکال می‌باشد، که نسبت به مقدار بیشینه مربوط به سری *RAPSS25* کاهش یافته است. می‌توان دلیل کاهش مقاومت خمشی در نمونه *RAPSS50* نسبت به نمونه *RAPSS25* را در عدم پوشش مناسب درصد خرده آسفالت‌های با سرباره دانست. تحقیقات دبارما و همکارانش [۵] هم بیانگر نتیجه‌ای مشابه، با تعویض ۵۰ درصد مصالح طبیعی با مصالح خرده آسفالتی است. البته مقاومت خمشی بالاتری نسبت به پژوهش حاضر حاصل گردید. میزان مقاومت خمشی برای نمونه *RAPSS75* برای عمر ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب برابر $\frac{3}{1}$ و $\frac{3}{6}$ مگاپاسکال می‌باشد. در نمونه *RAPSS100* میزان مقاومت خمشی بیشینه ($\frac{3}{1}$ مگاپاسکال برای عمر ۲۸ روزه و $\frac{2}{6}$ مگاپاسکال برای عمر ۷ روزه) است.

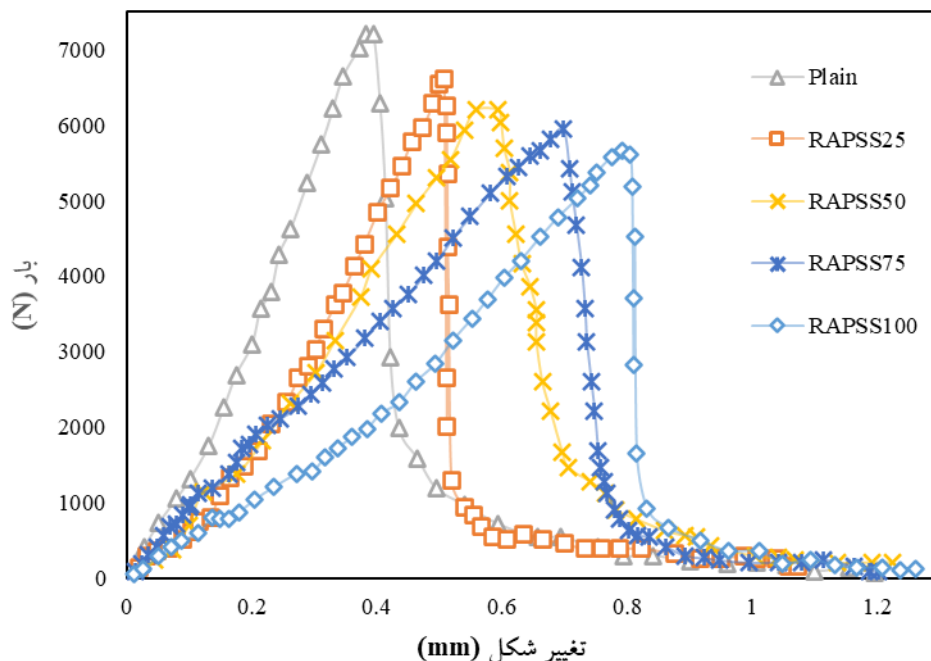
در شکل ۷، بررسی نتایج مقاومت خمشی بیانگر این موضوع است، که افزایش درصد مصالح خرده آسفالتی و سرباره فولاد جایگزین مصالح سنگی منجر به کاهش مقاومت خمشی می‌شود؛ در حالی که افزودن سرباره به تنهایی به عنوان اتصال دهنده‌ای میان خرده آسفالت می‌تواند باعث انتقال تنش شود و در نتیجه مقاومت خمشی را افزایش دهد. همچنین مشاهده می‌شود که استفاده از مصالح خرده آسفالتی اثر کاهشی کمتری بر مقاومت خمشی داشته است تا مقاومت فشاری. سرباره به دلیل فعل و انفعالات شیمیایی و نیز تیزگوشگی می‌تواند اتصال مناسبی را برقرار کند. وجود سرباره فولاد ریزدانه که دارای سطح مخصوص زیاد است، به دلیل مقدار زیاد *CaO* آزاد در سرباره فولاد، باعث ایجاد خصوصیات مکانیکی نامطلوب در مخلوط شده است. در پژوهش روح الامینی و همکارانش [۹] نیز استفاده از ۵۰ درصد سرباره جایگزین مصالح ریزدانه سبب کاهش ۲۸ درصدی مقاومت خمشی شد؛ در حالی که، با جایگزینی ۲۵ درصدی، تنها ۳ درصد کاهش مشاهده گردید.



شکل ۷- نمودار مقاومت خمشی

۵-۴- بررسی چقرمگی

با استفاده از نمودار بار- تغییرمکان، قابلیت جذب انرژی نمونه‌ها که معرف میزان تغییر شکل پذیری نمونه‌ها تا وقوع شکست بوده، قابل ارزیابی است. مطابق تعریف ارائه شده در استاندارد *JCISF4*، میزان قابلیت جذب انرژی یا چقرمگی برای نمونه‌های تیر شکل برابر با مساحت زیر نمودار بار- تغییر مکان تا نقطه $L/150$ است. برای محاسبه قابلیت جذب انرژی، محور افقی نمودار (تغییرشکل) تا نقطه $L/150$ در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه در این پژوهش، L (فاصله بین دو تکیه گاه)، ۲۰۰ میلیمتر در نظر گرفته شد، پارامتر $L/150$ برابر با $1/3$ میلیمتر به دست می‌آید و محور افقی تا این مقدار در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۸ که منحنی تغییرات بار- تغییرشکل در آزمایش مقاومت خمشی ۲۸ روزه می باشد، داده ها برای تمامی ترکیبات مورد مطالعه نمایش داده شده است. چقرمگی، جذب انرژی پیش از شکست را نشان می دهد، که به ظرفیت تحمل بار و تغییر شکل مربوطه پیش از شکست بستگی دارد. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، با افزایش مصالح خرده آسفالتی به عنوان جایگزین مصالح سنگی درشت دانه و سرپاره فولاد به عنوان مصالح سنگی ریزدانه، چقرمگی و قابلیت جذب انرژی افزایش می‌یابد، که به دلیل افزایش تغییر شکل مخلوط‌های حاوی این مصالح است. بدین ترتیب، بیشترین مقدار چقرمگی مربوط به نمونه *RAPSS100* و همچنین کمترین مقدار مربوط به نمونه شاهد می‌باشد. در تحقیقات مدرس و حسینی [۲۲] نیز نتایج، نشانگر تأثیر مثبت خرده آسفالت در افزایش قابلیت جذب انرژی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های شاهد بوده است. یکی از نکات قابل توجه در شکل ۸ آن است که نمونه‌های بتنی حاوی خرده آسفالت بیشتر، علی‌رغم کمتر بودن مقدار بار حداکثر، تغییر شکل‌های بزرگتری را قبل از وقوع شکست تحمل کرده‌اند. در واقع با کاهش مقاومت خمشی، چقرمگی افزایش می‌یابد. در مخلوط‌های حاوی مصالح سنگی طبیعی، علاوه بر این که مقاومت خمشی بالاتر بود، شکست به صورت ناگهانی و سریع اتفاق افتاد. زیرا هر چه تحمل بار بیشتر باشد، شکست سریعتر اتفاق می‌افتد و جذب انرژی کمتر می‌شود. شایان ذکر است که در انجام آزمایش مقاومت فشاری نیز شواهدی مشاهده شد که نشانگر جذب بالای انرژی و تاب بیشتر نمونه‌های حاوی مصالح خرده آسفالت تا وقوع شکست نهایی بود. این نمونه‌ها، همانند نمونه‌های شاهد، به سرعت و به طور ناگهانی به مرحله شکست نمی‌رسیدند.

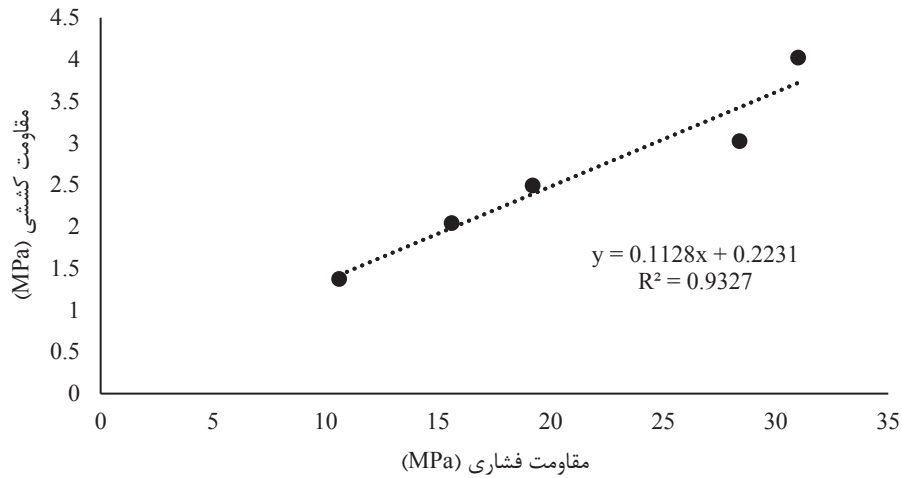


شکل ۸- منحنی تغییرات بار- تغییرشکل در آزمایش مقاومت خمشی ۲۸ روزه

۵-۵- بررسی رابطه میان پارامترهای مقاومتی

شکل ۹ همبستگی بین نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت کششی را در مدت عمل آوری ۲۸ روز نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، مقاومت کششی ۲۸ روزه بتن غلتکی مورد مطالعه، با رابطه (۳) از مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن استنتاج می‌شود. مقدار R^2 نشان می‌دهد که رابطه مربوطه از قابلیت اطمینان خوبی برخوردار است.

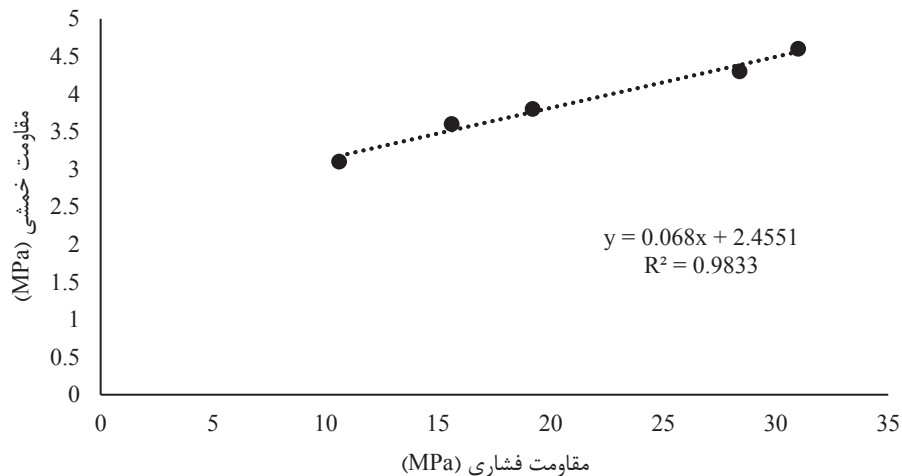
$$y = 0.1128x + 0.223 \quad (3)$$



شکل ۹- رابطه بین نتایج مقاومت فشاری و مقاومت کششی ۲۸ روزه

شکل ۱۰ همبستگی بین نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت خمشی را در مدت عمل آوری ۲۸ روز نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، مقاومت خمشی ۲۸ روزه بتن غلتکی مورد مطالعه، با رابطه (۴) از مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن استنتاج می‌شود. مقدار R^2 نشان می‌دهد که رابطه (۴) دارای قابلیت اطمینان بسیار مناسبی است.

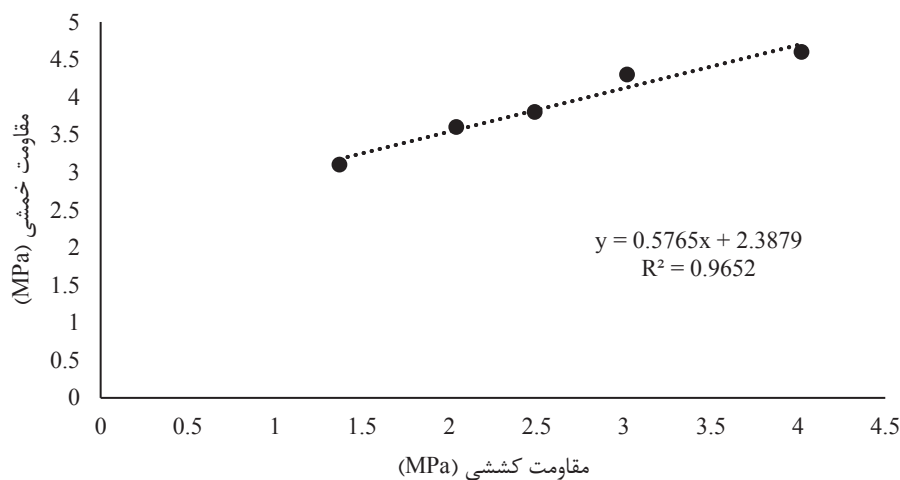
$$y = 0.068x + 2.4551 \quad (4)$$



شکل ۱۰- رابطه بین نتایج مقاومت فشاری و مقاومت خمشی ۲۸ روزه

شکل ۱۱ همبستگی بین نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی و مقاومت خمشی را در مدت عمل آوری ۲۸ روز نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۱۱، مقاومت خمشی ۲۸ روزه بتن غلتکی مورد مطالعه، با رابطه (۵) از مقاومت کششی ۲۸ روزه آن استنتاج می‌شود. مقدار R^2 نشان می‌دهد که رابطه (۵) از دقت برازش خوبی برخوردار است.

$$y = 0.5765x + 2.3879 \quad (۵)$$



شکل ۱۱- رابطه بین نتایج مقاومت کششی و مقاومت خمشی ۲۸ روزه

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، امکان استفاده از مصالح خرده آسفالت بازیافتی به عنوان جایگزین مصالح درشت دانه و سربراره فولاد به عنوان جایگزین مصالح ریزدانه با درصد‌های متفاوت در روسازی بتن غلتکی مورد ارزیابی قرار گرفته است. بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده، بیانگر آن است که یک مخلوط با درصد مناسبی از خرده آسفالت و سربراره فولاد می‌تواند علاوه بر حفظ خصوصیات مکانیکی نمونه، موجب کاهش اثرات نامطلوب زیست محیطی حاصل از دپوی خرده آسفالت و سربراره فولاد شود. سربراره ریزدانه، فضای بین ماتریس مصالح و خرده آسفالت را پر کرده و در نتیجه، مخلوط بتن غلتکی، با استفاده از مقادیر کمتر سیمان به مقاومت‌های مناسبی از بتن برسد. این بدان معنا می‌باشد که با استفاده از درصد مناسب از مصالح می‌توان به مقاومت‌های قابل قبولی همراه با کاهش مقادیر سیمان دست یافت؛ در صورتی که استفاده بیش از اندازه از این مواد سبب افت خواص مکانیکی خواهد شد. مهم‌ترین نتایج پژوهش صورت گرفته شامل موارد ذیل است:

- با افزایش استفاده از مصالح خرده آسفالتی و سربراره فولاد، مقاومت فشاری مخلوط نسبت به مقادیر مجاز مطابق با استاندارد ACI (۲۷/۶ مگاپاسکال) کاهش می‌یابد، به طوری که در نمونه‌های ۲۸ روزه با جایگزین کردن کل مصالح سنگی طبیعی با مصالح خرده آسفالتی و سربراره فولاد، مقاومت فشاری ۶۱/۶ درصد کاهش یافت و نتوانست حداقل مقاومت فشاری لازم مطابق با استاندارد های مربوطه را کسب کند.
- تنها نمونه ۲۸ روزه حاوی ۲۵٪ مصالح خرده آسفالتی و سربراره فولاد حداقل مقاومت فشاری لازم مطابق با استانداردهای مربوطه را داراست. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش میزان مصالح بازیافتی و سربراره فولاد در نمونه‌های بتن غلتکی، مقاومت فشاری به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است.

- با افزایش استفاده از مصالح خرده آسفالتی و سرباره فولاد، مقاومت کششی و خمشی مخلوط کاهش یافت. با این حال، مقاومت کششی و خمشی ۲۸ روزه نمونه های حاوی ۰.۲۵٪، ۰.۵۰٪ و ۰.۷۵٪ مصالح خرده آسفالتی و سرباره، بالاتر از مقادیر مجاز مطابق با آیین نامه می باشد و حد نصاب لازم را داراست.
- نسبت شدت کاهش مقاومت خمشی در نمونه ها با سنگدانه بازیافتی نسبت به کاهش مقاومت فشاری بسیار کمتر می باشد؛ به طوری که در نمونه با صد در صد جایگزینی مصالح بازیافتی، میزان کاهش مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد حدود ۳۳ درصد می باشد. همچنین بررسی رابطه میان پارامترهای مقاومتی نشان می دهد که همبستگی خوبی بین نتایج آزمایش های مقاومت فشاری، کششی و خمشی برقرار است.
- با افزایش مصالح خرده آسفالتی به عنوان جایگزین مصالح سنگی درشت دانه و سرباره فولاد به عنوان مصالح سنگی ریزدانه، مقدار بار حداکثر کاهش یافت؛ ولی با توجه به افزایش تغییر شکل پذیری مخلوط های بتن غلتکی، قابلیت جذب انرژی و به تبع آن چقرمگی افزایش یافت.

۷- تشکر و قدردانی:

نویسندگان مقاله از پرسنل و کارشناسان محترم آزمایشگاه بتن دانشگاه تربیت مدرس جهت همکاری صمیمانه در انجام آزمایش های مربوطه و همچنین شرکت سیمان تهران و کارخانه فولاد مبارکه اصفهان کمال تشکر و قدردانی را می نمایند.

منابع

- [1]. Courard, L, Michel, F, and Delhez, P, (2010), *Use of concrete road recycled aggregates for roller compacted concrete*, *Constr. Build. Mater*, 24(3): 390-395.
- [2]. Huang, B, Shu, X. and Burdette, E, (2006), *Mechanical properties of concrete containing recycled asphalt pavements*, *Mag Concrete Res*, 58(5): 313-320.
- [3]. Hossiney, N, Wang, G, Tia, M. and Bergin, M. (2008), *Evaluation of concrete containing RAP for use in concrete pavement*, *J. Pavement Res. Technol*, 3(5):251-258
- [4]. Debbarma, S, Ransinchung RN, G. D. and Singh, S, (2019), *Feasibility of roller compacted concrete pavement containing different fractions of reclaimed asphalt pavement*, *Constr. Build. Mater*, 199: 508-525.
- [5]. Debbarma, S, Singh, S, and Ransinchung RN, G. D, (2019), *Laboratory investigation on the fresh, mechanical, and durability properties of roller compacted concrete pavement containing reclaimed asphalt pavement aggregates*, *Transport. Res. Record J. Transport. Res. Board*, 2673(10): 652-662.
- [6]. Mostofi Nejad, D, Nazari Monfared, H, (2006), *Addition of slag and limestone powder to concrete to increase the durability of concrete in sulfate environment*, *Journal of Transportation Research*, 3(2): 139-145 (In presian).
- [7]. Mohammadpour, R, Javadi, S, (2022), *effect of iron concentrate on permeability and compressive strength of concrete*, *Journal of Concrete Structures and Materials*, 6(1): 162-179 (In presian).
- [8]. Lam, M. N. T, Jaritngam, S, and Le, D. H, (2017), *Roller-compacted concrete pavement made of electric arc furnace slag aggregate: Mix design and mechanical properties*, *Constr. Build. Mater*, 154: 482-495.
- [9]. Rooholamini, H, Sedghi, R, Ghobadipour, B, and Adresi, M, (2019), *Effect of electric arc furnace steel slag on the mechanical and fracture properties of roller-compacted concrete*, *Constr. Build. Mater*, 211: 88-98.
- [10]. Fakhrian, S, Mashhadi, S, Behbahani H, (2020), *Compressive strength of fibrous concrete containing crumb rubber under fire*, *Journal of Concrete Structures and Materials*, 5(1): 47-59 (In presian).

- [11]. Manso, J. M, Polanco, J.A, Losañez, M.J, González, J, (2006), *Durability of concrete made with EAF slag as aggregate*, *Cem. Concr. Compos*, 28 (6) 528–534.
- [12]. Faleschini, xF, Alejandro Fernandez-Ruiz, M, Zanini, M.A, Brunelli, K, Pellegrino, C, Hernandez-Montes, E, High, (2015), *performance concrete with electric arc furnace slag as aggregate: Mechanical and durability properties*, *Constr. Build. Mater*, 101: 113–121.
- [13]. Palankar, N, Ravi Shankar, A.U, Mithun, B.M, (2016), *Durability studies on eco-friendly concrete mixes incorporating steel slag as coarse aggregates*, *J. Clean. Prod*, 129: 437–448.
- [14]. Adeboje, A. O., Kupolati, W. K., Sadiku, E. R., Ndambuki, J. M., & Kambole, C, (2020), *Experimental investigation of modified bentonite clay-crumb rubber concrete*. *Construction and Building Materials*, 233: 117.
- [15]. Ji, Tao, Chen, Cai-Yi, Chen, Yuan-Yuan, Zhuang, Yi-Zhou, Chen, Jian-Feng, Lin, Xu-jian, (2013), *Effect of moisture state of recycled fine aggregate on the cracking resistibility of concrete*, *Construction and Building Materials* 44: 726–733.
- [16]. Ismail, Sallehan, Ramli, Mahyuddin, (2013), *Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications*, *Construction and Building Materials*, 44: 464–476.
- [17]. Karimi, M, Hassani, A, Sodagari J, Arab Ameri, H, (2011), *Laboratory Investigation about utilization of recycled asphalt pavements as a substitute for aggregates in roller compacted concrete pavements*, *Journal of Transportation Engineering*, 3(1):69-79 (In presian).
- [18]. Ameli A.R, Parvaresh Karan E, Hashemi S. A. H, (2018), *The effect of using waste materials on mechanical performance of RCC*, *Journal of Transportation Research*, 15(55):271-276 (In presian).
- [19]. ASTM C3, (2009), *Standard test for fireproof partition construction*, ASTM international, West Conshohocken, PA.
- [20]. ASTM C127, (2016), *Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate*, ASTM international, West Conshohocken, PA.
- [21]. ASTM C128, (2016), *Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate*, ASTM international, West Conshohocken, PA.
- [22]. Modarres, A, Hosseini, Z, (2014), *Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material*, *Mater. Design*, 64: 227-236.
- [23]. E. Rahmani, M.K. Sharbatdar, M.H.A. Beygi, (2020), *The effect of water-to-cement ratio on the fracture behaviors and ductility of Roller Compacted Concrete Pavement (RCCP)*, *Theor. Appl. Fract. Mech*, 109:102753.
- [24]. Fakhri, M, Amosoltani, E, (2017), *The effect of reclaimed asphalt pavement and crumb rubber on mechanical properties of roller compacted concrete pavement*, *Constr. Build. Mater*, 137: 470-484.
- [25]. Hesami, S, Modarres, A, Soltaninejad, M, and Madani, H, (2016), *Mechanical properties of roller compacted concrete pavement containing coal waste and limestone powder as partial replacements of cement*, *Constr. Build. Mater*, 111: 625-636.
- [26]. Berry, J. R. (2001), *Report on roller-compacted concrete pavements*, Farmington Hills, MI: ACI committee report.
- [27]. Lopez-Uceda, A, Agrela, F, Cabrera, M, Ayuso, J, and López, M, (2018), *Mechanical performance of roller compacted concrete with recycled concrete aggregates*, *Road Mater. Pavement Design*, 19(1): 36-55.